

长短脉冲复合激光对铝材的损伤机制

王秋实^{**}, 庞博, 张亦卓, 胡文华, 李忠建^{*}

中国航空制造技术研究院光电技术研究室, 北京 100024

摘要 探索了长短脉冲复合激光在铝材损伤方面的应用。基于激光与材料相互作用的热效应原理, 讨论了材料表面反射率、激光与材料耦合系数等对损伤机制的影响, 数值计算了长脉冲激光辐照对 2A12 铝材的热效应、短脉冲激光对铝材的冲击压强及损伤时间。设计了长短脉冲复合激光辐照实验系统。结果表明, 设计的长短脉冲复合激光器能够实现对 2A12 铝材的有效快速损伤, 损伤效果好于单独的长脉冲或短脉冲作用, 有效降低了损伤时间。

关键词 激光技术; 激光损伤; 脉冲激光; 高能激光器

中图分类号 TN248.1; TN249; O432.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.101404

Damage Mechanism of Aluminum by Long-Short Composite Pulsed Laser

Wang Qiushi^{**}, Pang Bo, Zhang Yizhuo, Hu Wenhua, Li Zhongjian^{*}

Division for Electro-Optics Technology, Manufacturing Technology Institute, Aviation Industry Corporation of China, Beijing 100024, China

Abstract The application of a long-short composite pulsed laser in aluminum damage is explored. The influences of the reflectivity of material surface and the laser-material-coupling coefficient on damage mechanism are also discussed based on the thermal effect in laser-material interaction. The impact pressure and damage time of a short pulsed laser on aluminum and the thermal effect of a long pulsed laser irradiation on 2A12 aluminum are numerically calculated. A long-short composite pulsed laser irradiation experimental system is designed. The results show that the designed long-short composite pulsed laser can be used to damage 2A12 aluminum effectively and rapidly. Moreover, the damage effect is superior to that by the single long or short pulsed laser, and the damage time is effectively reduced.

Key words laser technique; laser damage; pulsed laser; high energy laser

OCIS codes 140.3330; 140.3538; 140.3325; 140.3298

1 引言

激光对抗系统主要利用脉冲激光破坏对方导弹、探测器等设备上的光电传感器, 损伤红外热像仪和红外制导导弹的导引头等^[1]。上述激光武器对功率要求不高, 称为“软杀伤”激光武器^[2]。对于以近红外方式制导的导弹、火箭弹来说, 对其表层的金属材料进行直接损伤的“硬杀伤”方式将更为有效^[3-4]。“硬杀伤”方式需要功率高达 150 kW 以上的高功率激光器, 其体积质量都是非常庞大的^[1]。以较低功率的激光实现对金属材料的损伤, 减少激光对材料

的损伤时间, 是一个重要的工程课题。

本文参考前人利用长脉冲和短脉冲交替输出的复合脉冲激光^[5-6]辐照沉积纳米金刚石薄膜的技术方案^[7], 从激光脉冲对金属材料的熔融和冲击弯曲机制出发^[8-12], 讨论了材料表面反射率、激光与材料耦合系数等对损伤机制的影响, 提出了“硬杀伤”型激光武器的一种设计思路: 以短脉冲和长脉冲激光烧蚀结合的方式, 加速激光对铝材料的损伤。通过搭建实验平台, 探索了长短脉冲激光联合使用对 2A12 铝合金材料损伤时间的影响, 并对损伤结果进行了分析。

收稿日期: 2018-03-30; 修回日期: 2018-05-03; 录用日期: 2018-05-09

基金项目: 航空科学基金(2016ZC25002)、陆航装备预研基金(30104031004)

* E-mail: mylame@163.com; ** E-mail: wangqiushi210@mails.ucas.ac.cn

2 激光对金属壁板的损伤机制研究

2.1 激光对金属壁板的热损伤机制

探讨激光对金属壁板的热损伤机制,主要关注的是击穿厚度为 z 的壁板所需的熔融时间 t_m 和汽化时间 t_v 。对于各向同性的均匀材料而言,功率密度为 q 的激光通过厚度为 dz 的材料薄层后,激光功率密度的相对减少量 dq/q 与吸收层厚度 dz 成正比,即

$$dq/q = \alpha dz, \quad (1)$$

式中 α 为吸收系数,单位为 cm^{-1} ,对于波长 $1 \mu\text{m}$ 的近红外激光,铝金属的吸收系数近似为常数^[13]。假设入射到壁板表面的激光功率密度为 q_{inc} ,则透入表面($z=0$)处的穿透功率密度为 $(1-R)q_{\text{inc}}$, R 为表面反射率。对(1)式积分,可得激光入射到距表面 z 处的激光功率密度为

$$q = (1-R)q_{\text{inc}} \cdot \exp(-\alpha z). \quad (2)$$

对于飞机表面的金属壁板模型,假定激光束垂直入射表面($z=0$),受照壁板位于 $z \geq 0$ 的半空间,表面对激光的反射率为 R ,吸收系数为 α ,入射功率密度在表面处为 $q_{\text{inc}}(x, y, t)$,则铝金属壁板轴向的温升分布可以利用一维傅里叶热传导方程描述为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(k \nabla T) + (1-R)\alpha \cdot q_{\text{inc}} \cdot \exp(-\alpha z) + Q_{\text{other}}, \quad (3)$$

式中 ρ 为材料的密度, c 为比热容, T 为材料的温度, t 为激光作用时间, k 为材料的热导率, Q_{other} 为其他热源。对于激光辐照的表面,仅存在面热源,对于边界条件 $z=0$,有

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = (1-R)q_{\text{inc}}(x, y). \quad (4)$$

当材料开始熔融时,熔融时间

$$t_m^* \geq \frac{\rho z}{(1-R)\alpha \cdot q_{\text{inc}} \cdot \exp(-\alpha z)} \times [c(T_m - T_0) + Q_m], \quad (5)$$

式中 T_0 为初始温度, Q_m 为熔点 T_m 处的熔融潜热。存在材料汽化现象时,汽化时间为

$$t_v^* \geq \frac{\rho z}{(1-R)\alpha \cdot q_{\text{inc}} \cdot \exp(-\alpha z)} \times [c(T_v - T_0) + Q_m + Q_v], \quad (6)$$

式中 Q_v 为沸点 T_v 处的汽化潜热。(5)、(6)式表明,材料表面反射率 R 越低,入射激光功率密度 q_{inc} 越高,所需的损伤时间越短。

激光对金属壁板的热效应受到热耦合系数 C_{th} 的影响:在低入射功率条件下,热耦合系数 $C_{\text{th}} = 1-R$;高入射功率时,材料表面将发生质量迁移,部分激光能量进入迁移物中,导致沉积在材料表面的激光能量降低,不利于材料的损伤^[13]。根据 Hettche 等^[14] 的研究,入射功率密度 $q_{\text{inc}} > 10^6 \text{ W/cm}^2$ 时,铝金属材料对 $1.06 \mu\text{m}$ 波长激光的热耦合系数 C_{th} 为 $0.10 \sim 0.20$,随着激光入射功率密度的增大而减小。原因是在高峰值功率密度激光辐照下,材料表面形成高温、高压等离子体吸收激光,从而使热耦合系数减小。在入射功率密度 $q_{\text{inc}} > 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时,(5)、(6)式中的 $(1-R)$ 以热耦合系数 C_{th} 代替。

这里讨论的金属壁板材料为 2A12 硬铝,该硬铝主要用于制造高负荷零件,如工作温度在 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下的飞机骨架、框隔、翼梁、翼肋和蒙皮等,其厚度在 $0.5 \sim 10 \text{ mm}$ 不等。其物性参数见表 1,其中吸收系数 α 和热耦合系数 C_{th} 的取值参考 Hettche 等^[14] 给出的平均结果。

利用表 1 的物性参数以及(5)、(6)式计算损伤时间,得到图 1 所示的烧蚀时间与激光功率和材料厚度的关系。由图 1 可知,对于峰值功率密度在 10^7 W/cm^2 及以上的高峰值功率激光,mm 量级厚度的 2A12 硬铝其表面熔融时间 t_m 在 ms 量级,表面汽化时间 t_v 在 10 ms 量级。提高入射激光功率密度 q_{inc} ,降低材料自身的反射率 R 或提高热耦合系数 C_{th} ,均可加速对 2A12 硬铝的损伤。

表 1 2A12 铝的部分物理化学特性参数^[13-14]

Table 1 Some physical and chemical parameters of 2A12 aluminum^[13-14]

State of Al	$k / [\text{W} \cdot (\text{cm} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$	$Q_m / (\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1})$	$Q_v / (\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1})$	$T_m / ^\circ\text{C}$	$T_v / ^\circ\text{C}$	$c / [\text{J} \cdot (\text{g} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$	Density / $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	Absorption coefficient / cm^{-1}	Thermal coupling coefficient
Solid	2.0	0.4	—	640	—	—	—	—	—
Liquid	1.0	—	11	—	2430	1.0	2.7	10^6	0.15

2.2 脉冲激光对金属壁板的冲击损伤机制

高峰值功率的脉冲激光对材料的喷射冲量,造

成材料表面弯曲甚至层裂损伤。激光热击波的应力峰值是引起层裂的重要因素。由气体爆轰波的

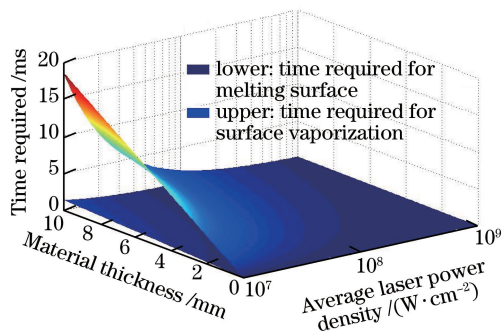


图1 激光烧蚀 2A12 铝材所需的时间与激光功率密度、材料厚度的关系

Fig. 1 Time for laser ablation of 2A12 aluminum versus laser power density and material thickness

Chapman-Hugoniot 条件^[15]得到该波阵面后的压强为

$$P = \left(\frac{\gamma + 1}{2\gamma} \right)^{\frac{2\gamma}{\gamma-1}} \cdot \frac{\rho_0}{\gamma + 1} \left[\frac{2(\gamma^2 - 1) q_{inc}}{\rho_0} \right]^{\frac{2}{3}}, \quad (7)$$

式中 $\gamma \approx 1.2$ 表示波阵面后的大气比热比; $\rho_0 = 1.25 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ 是周围大气的质量密度。由(7)式分析可得激光峰值功率密度与表面冲击压强的关系,如图2所示。

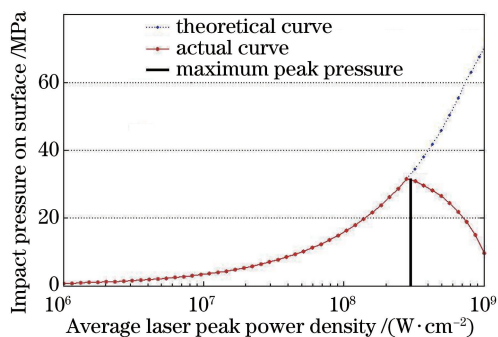


图2 激光峰值功率密度与表面冲击压强间的关系

Fig. 2 Laser peak power density versus surface impact pressure

由图2可知,激光峰值功率密度为 $10^6 \sim 10^7 \text{ W/cm}^2$ 时,产生的冲击压强较小;激光冲击压强随激光入射功率密度的增加而增加,直到峰压极大值。该峰压极大值是 Hettche 实验测得量,此时的 $q_{inc} \approx 3 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ ^[13],曲线出现一个拐点,之后峰压随入射功率密度的增加而减小。这个峰压极大点表示金属表面等离子体开始生成并开始吸收入射激光能量而遮挡表面,这将导致激光与金属材料的热耦合系数 C_{th} 减小。

2.3 长短脉冲复合激光的损伤机制讨论

激光与物质相互作用的时间 $\tau = \rho c / \pi k \cdot S$, 其中 S 为激光在板材表面的照射面积。对于直径 $\Phi \approx$

5 mm 的激光光斑,取表1中所列各物态数据,可得 $\tau \approx 10^{-6} \text{ s}$ 。因此,定义激光脉冲宽度 $\tau_{laser} \geq \tau$ 的为长脉冲; $\tau_{laser} < \tau$ 的激光脉冲为短脉冲。由2.2节结论可知,长脉冲激光受脉宽影响,其峰值功率密度多在 $10^6 \sim 10^7 \text{ W/cm}^2$ 水平,因而其冲击效应较小,主要考虑其热效应。短脉冲激光峰值功率密度可达 10^8 W/cm^2 以上,在考虑其热效应的同时,也考虑其冲击效应。

下面定性地讨论长短脉冲的复合作用。短脉冲激光形成的冲击压强可达 30 MPa,将会对材料表面造成部分损伤,使得材料表层反射率 R 从约 0.75 减小至约 0.4^[16]。如果将短脉冲激光和长脉冲激光同时复合输出,依据(5)、(6)式,反射率 R 减小将使得熔融时间 t_m 和汽化时间 t_v 有效降低,相比单独使用长脉冲激光,能够更快速地实现材料的熔融损伤。另一方面,单独使用短脉冲激光会产生金属表面的等离子体层,使得热耦合系数 C_{th} 减小;同时复合输出长脉冲激光,提供的较高平均功率能够加快材料表面的质量迁移,破坏金属表面的等离子体层,比单独使用短脉冲激光,能更快速地实现材料的熔融损伤。值得注意的是,短脉冲脉宽 $\tau_{laser} < 10^{-6} \text{ s}$, 而 t_m 、 t_v 为 ms 量级,激光作用时间 τ_{laser} 过小,并不足以产生累积效应。

由以上结论可知,采用长短脉冲复合激光,能够减小金属材料表面反射率 R , 加快激光的损伤效果;同时,激光在材料表面的累计作用时间应大于材料的汽化时间 t_v , 从而实现金属材料损伤。

3 长短脉冲复合激光实验

利用 μs 级长脉冲激光器 A 和 ns 级短脉冲激光器 B, 搭建了图3所示的实验平台。两台激光器使用同一时钟控制单元,并束输出,使得两路激光在实验样品上的光斑位置相同,激光光斑尺寸约为 5 mm。样品为飞行器典型金属 2A12 硬铝材料,厚度为 1.4 mm,表面光滑。利用上述实验平台,验证长短脉冲复合激光的损伤效果。

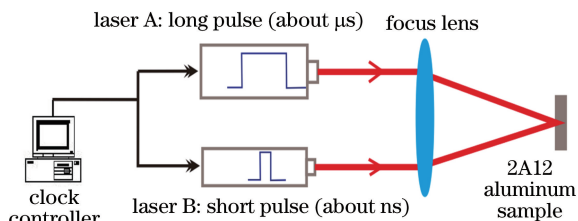


图3 实验平台光路示意图

Fig. 3 Schematic of optical path of experimental platform

只开启 μs 级长脉冲激光器 A,使得样品表面光斑的平均功率密度约为 $7.5 \text{ kW}/\text{cm}^2$;持续照射 10 s 后,损伤效果如图 4(a)所示,铝材表面出现部分熔融痕迹。图 4(a)表明,在该实验条件下,样品的损伤阈值应远大于其接受到的激光辐照平均功率密度 $7.5 \text{ kW}/\text{cm}^2$ 。只开启 ns 级短脉冲激光器 B,使得样品表面光斑的平均功率密度约为 $4.2 \text{ kW}/\text{cm}^2$;持续照射 10 s 后,损伤效果如图 4(b)所示,铝材表面出

现了明显的熔融痕迹。图 4(b)表明,在该实验条件下,样品的损伤阈值应大于其接受到的激光辐照的平均功率密度 $4.2 \text{ kW}/\text{cm}^2$ 。

接下来验证长短脉冲复合激光的损伤效果,两台激光器使用同一控制单元控制,能够控制脉冲的时域重合情况。当脉冲时间差为 2 ms 时(长脉冲在前),与脉冲时域交叠(短脉冲时域被长脉冲时域覆盖)相比,铝材表面的损伤结果完全不同。

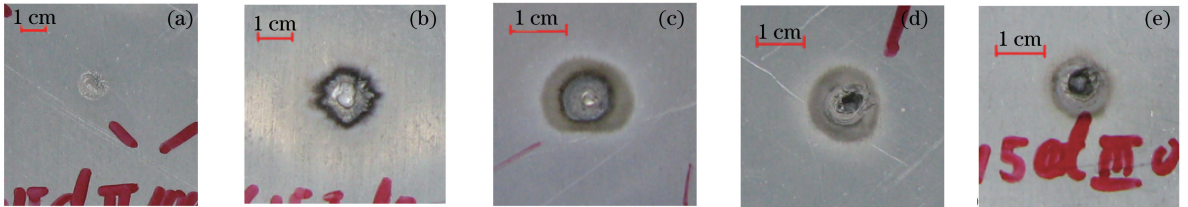


图 4 不同条件下 2A12 铝材的损伤结果。(a)仅采用长脉冲激光;(b)仅采用短脉冲激光;(c)长短脉冲复合,时间差 2 ms;(d)长短脉冲时域交叠;(e)长短脉冲时域交叠,重复频率减半

Fig. 4 Damage results of 2A12 aluminum under different conditions. (a) Long pulsed laser only; (b) short pulsed laser only; (c) long-short composite pulse with time difference of 2 ms; (d) long-short pulse overlapping in time domain; (e) long-short pulse overlapping in time domain with half repetition rate

图 4(c)所示为脉冲时域差为 2 ms 的条件下(长脉冲在前),长短脉冲复合激光对 2A12 硬铝材料的损伤结果:在该条件下,样品表面上光斑的平均功率密度约为两者的算术叠加,即 $11.7 \text{ kW}/\text{cm}^2$,表面熔融情况强于图 4(a)所示。样品损伤程度的增加是功率密度提高带来的结果。图 4(d)所示为脉冲时域交叠状态下,长短脉冲复合激光在 1 s 内将样品表面击穿。此时样品的损伤阈值小于 $11.7 \text{ kW}/\text{cm}^2$ 。然而,同单台激光相比,两台激光器同时发射,一方面导致了功率的叠加,造成样品表面平均功率密度的增加;另一方面,导致了实际作用在

样品表面的激光重复频率也随之加倍。因此,使用控制单元将两台激光器的重复频率全部减半,使得图 4(e)组重复频率和前 4 组相同,此时样品表面平均功率密度为 $11.7 \text{ kW}/\text{cm}^2$ 的一半,约为 $5.9 \text{ kW}/\text{cm}^2$ 。平均功率密度减半后,仍然可在 1 s 内将样品击穿,表明样品的损伤阈值小于 $5.9 \text{ kW}/\text{cm}^2$ 。由此可见,长短脉冲激光组合使用的损伤效果,与其重复频率的叠加没有必然的关系。

不同实验条件下 2A12 铝材样品的损伤阈值和损伤时间的汇总结果见表 2,从表 2 可以看出,当长短脉冲激光联合使用且时域重合时,损伤效果最好。

表 2 1.4 mm 厚 2A12 铝合金材料损伤情况汇总

Table 2 Summary of damages of 1.4 mm thick 2A12 aluminum material

Laser working mode	Damage threshold / ($\text{kW} \cdot \text{cm}^{-2}$)	Time required /s
μs long pulsed laser only	$\gg 7.5$	$\gg 10$
ns short pulsed laser only	$\gg 4.2$	> 10
Long-short pulse overlapping in time domain with repetition rate unchanged	< 11.7	< 1
Long-short pulse overlapping in time domain with half repetition rate	< 5.9	< 1
Long-short pulse overlapping with time difference of 2 ms, long pulse ahead, and repetition rate unchanged	> 11.7	10

4 结 论

理论分析和实验结果表明,长短脉冲复合激光能够利用短脉冲的冲击效应,减小金属材料表面反射率 R ,结合长脉冲激光的烧蚀作用,能够降低金属

材料的损伤时间。实验条件下,2A12 铝材的损伤时间相比单独使用长脉冲激光器或短脉冲激光器均有效减少,从 10 s 减至 1 s,且损伤效果比单独使用长脉冲激光器或短脉冲激光器更好。

通过长短脉冲复合技术,能够实现短时间内的

高效损伤,该结论对组成适用于硬杀伤的激光武器具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Li Z J, Cui L. Development and application of laser technology in machining industry and military industry [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2013, 441(21): 62-65.
李忠建, 崔丽. 激光技术在加工工业领域和军事领域的发展与应用[J]. *航空制造技术*, 2013, 441(21): 62-65.
- [2] Guan X X, Piao X Q, Sun J, *et al.* Research on soft-killing tactical laser weapon and its mechanism [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(2): 118-120.
关效贤, 朴贤卿, 孙晶, 等. 软杀伤战术激光武器及作用机理的研究[J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(2): 118-120.
- [3] Du C L. Interference of strong light on infrared guided anti-ship missile [J]. *Laser and Infrared*, 2016, 46(6): 752-754.
杜翠兰. 强光对红外成像反舰导弹干扰研究[J]. *激光与红外*, 2016, 46(6): 752-754.
- [4] Zhu J P, Ma Z, Gao L H, *et al.* Reflective laser protective coating based on plasma spraying [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2017, 10(5): 578-587.
朱锦鹏, 马壮, 高丽红, 等. 基于等离子喷涂的反射型激光防护涂层研究[J]. *中国光学*, 2017, 10(5): 578-587.
- [5] Gao Y K, Jiang Y T, Li X C. A new scheme of time-synchronization between long optical pulse and short optical pulse [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(7): 977-980.
高云凯, 蒋运涛, 李学春. 一种新的长短光脉冲同步方案[J]. *光子学报*, 2006, 35(7): 977-980.
- [6] Xu D G, Yao J Q, Wang Y Y, *et al.* The QCW-LD side-pumped Nd:YAG double mode pulse laser [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2008, 19(10): 1297-1300.
徐德刚, 姚建铨, 王与焯, 等. 准连续 LD 侧面泵浦的 Nd:YAG 双制式脉冲激光器[J]. *光电子 • 激光*, 2008, 19(10): 1297-1300.
- [7] Yang H M, Ren X D, Zheng L M, *et al.* Deposition of nano-diamond film by double beam pulse laser irradiation of graphite suspension [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(5): 0507001.
杨慧敏, 任旭东, 郑腊梅, 等. 双光束复合脉冲激光辐照沉积纳米金刚石薄膜[J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0507001.
- [8] Gamaly E G, Rode A V, Luther-Davies B, *et al.* Ablation of solids by femtosecond lasers: Ablation mechanism and ablation thresholds for metals and dielectrics [J]. *Physics of Plasmas*, 2002, 9(3): 949-957.
- [9] Jafarabadi M A, Mahdih M H. Investigation of phase explosion in aluminum induced by nanosecond double pulse technique [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 346: 263-269.
- [10] Yang X W, Zhou J Z, Sheng J, *et al.* Microstructure evolution and surface strengthening mechanism of TC6 titanium alloy by laser peening [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0914001.
杨祥伟, 周建忠, 盛杰, 等. TC6 钛合金激光喷丸组织演变与表面强化机理[J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 0914001.
- [11] Peng G L, Wei C H, Du T J, *et al.* Effect of airflow on metal plate melted through by laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(6): 061408.
彭国良, 韦成华, 杜太焦, 等. 气流作用下激光熔穿金属板效应研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(6): 061408.
- [12] Han F M, Xu S Z, Song W L, *et al.* Study of nanosecond laser ablation on aluminum and stainless steel targets [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(2): 0203005.
韩丰明, 徐世珍, 宋文亮, 等. 纳秒激光对铝合金和不锈钢的烧蚀特性研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(2): 0203005.
- [13] Sun C W, Lu Q S, Fan Z X, *et al.* Effect of laser irradiation [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002.
孙承伟, 陆启生, 范正修, 等. 激光辐照效应 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [14] Hettche L R, Tucker T R, Schriempf J T, *et al.* Mechanical response and thermal coupling of metallic targets to high-intensity 1.06- μ laser radiation [J]. *Journal of Applied Physics*, 1976, 47(4): 1415-1421.
- [15] Pirri A N. Theory for momentum transfer to a surface with a high-power laser [J]. *Physics of Fluids*, 1973, 16(9): 1435-1440.
- [16] Bulgakova N M, Bulgakov A V. Pulsed laser ablation of solids: Transition from normal vaporization to phase explosion [J]. *Applied Physics A*, 2001, 73(2): 199-208.